بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها و پایش آن توسط روش آکوستیک امیشن*

حسین حیدری[۱]　نوید ظریف کریمی[۲]　مهدی احمدی نجف‌آبادی[۳]　عبدالرضا رحیمی[٤]

چکیده *سوراخ‌کاری فرآیند اصلی برای مونتاژ کردن سازه‌های کامپوزیتی به‌ویژه در صنایع هوافضا و خودروسازی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین عیوبی که حین سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد، جدایش لایه‌ای است. در این مقاله اثر پارامترهای سوراخ‌کاری شامل نرخ پیش‌روی، سرعت برشی و زاویه‌ی رأس مته بر نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای با استفاده از روش طراحی آزمایش عاملی کامل بررسی می‌شود. با توجه به نتایج، نرخ پیش‌روی و به‌دنبال آن زاویه‌ی رأس مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر نیروی محوری می‌باشند. هم‌چنین نمودار احتمال نرمال برای برآورد اثرات پارامترهای مختلف بر فاکتور جدایش لایه‌ای استفاده گردید. مطابق نتایج تنها اثر معنادار، نرخ پیش‌روی است. روش آکوستیک امیشن به‌همراه روش تحلیل سیگنال موجک برای پایش فرآیند سوراخ‌کاری و تفکیک حوزه‌ی فرکانسی مکانیزم‌های مختلف برش به‌کار گرفته شده است. پس از تحلیل سیگنال‌های آکوستیک امیشن در حوزه‌ی زمان-فرکانس (موجک)، المان ۲ (EPC2) با محدوده‌ی فرکانسی ٦۲/۵-۱۲۵ کیلوهرتز به ترک خوردن ماتریس و المان ۵ (EPC5) با محدوده‌ی فرکانسی ۲۵۰-۳۱۲/۵ کیلوهرتز و میانگین درصد انرژی ۳۲٪ به برش الیاف نسبت داده شد.*

واژه‌های کلیدی سوراخ‌کاری با مته‌ی مارپیچ، کامپوزیت، آکوستیک امیشن، آنالیز موجک.

Study of the Effect of Machining Parameters on Drilling of Composite Materials and Monitoring of Process by Acoustic Emission

H. Heidary　N. Zarif Karimi　M. Ahmadi Najafabadi　A. Rahimi

Abstract *Drilling is one of the main machining processes carried out in the assembly stage of automobile manufacturing and aerospace components. Generally, delamination is considered as a major problem during drilling of composite materials. In this paper, the effects of feed rate, cutting speed and drill point angle on thrust force and delamination factor have been studied by using full factorial design. According to the results, feed rate has the most significant effect on thrust force followed by drill point angle. Moreover, the Half-Normal plot was used to identify which experiment factors have significant effects on the delamination factor; According to the results, feed rate has the most important effect. Acoustic emission signals and wavelet analysis were employed to monitor drilling process and discriminate frequency distributions of different cutting mechanisms. After time-frequency analyzing of AE signals, component 2 (EPC2) with frequency range of 62.5-125 kHz was attributed to matrix cracking and component 5 (EPC5) with frequency range of 250-312.5 kHz and average energy of 32% was attributed to fiber cutting.*

Key Words Twist Drilling, Composite, Acoustic Emission, Wavelet Analysis.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۱۰/۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/٤/۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق.

(۳) دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(٤) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

مقدمه

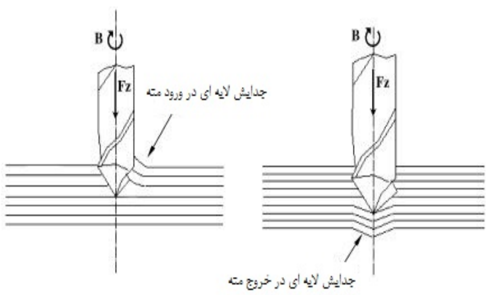
امروزه استفاده از کامپوزیت‌های پلاستیکی تقویت‌شده با الیاف شیشه (Glass Fiber Reinforced Plastic) در صنایع مختلف به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است که علت آن خواص ویژه‌ی این دسته از کامپوزیت‌ها ازقبیل سفتی ویژه‌ی بالا، مقاومت خوردگی بالا، انبساط حرارتی کم و مقاومت در برابر اشعه‌های اتمی می‌باشد. در مقایسه با فلزات، GFRP با وزن سبک‌تر، مقاومت به‌زوال بیش‌تری به‌واسطه‌ی اثرات شیمیایی و بیولوژیکالی دارد.

سوراخ‌کاری فرآیند اصلی برای اسمبل کردن سازه‌های کامپوزیتی به‌ویژه در صنایع هوافضا و خودروسازی می‌باشد. برخی گزارش کرده‌اند که بیش از ۱۰۰۰۰۰ سوراخ در یک موتور کوچک سازه فضایی وجود دارد که اکثراً اتصال‌دهنده می‌باشند. با وجود حجم بالای عملیات سوراخ‌کاری با انتخاب بهینه‌ی پارامترها و کاهش میزان خرابی می‌توان به میزان ٦٠٪ از میزان تلفات و از کار افتادگی قطعات جلوگیری نمود. هم‌چنین با وجود تنوع بسیار سازه‌های کامپوزیتی از نظر نوع ترکیب، خواص و نوع بارگذاری و کارکرد، یافتن پارامترهای ماشین‌کاری بهینه نیازمند هزینه و زمان زیادی می‌باشد [1].

یافتن شرایط برش مناسب به‌واسطه‌ی هم‌زمانی وجود فایبر ساینده و سخت و ماتریس نرم، دشوار است. عیوب ماشین‌کاری سوراخ اثر مهمی در کاهش مقاومت و عمر خستگی لمینت‌های کامپوزیتی دارد. به‌علاوه دانش موجود در ماشین‌کاری فلزات به‌طور مستقیم قابل استفاده در کامپوزیت‌ها نمی‌باشد [2].

مهم‌ترین عیوب به‌وجودآمده در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها جدایش لایه‌ای، انقباض سوراخ، بیرون کشیدگی الیاف و اثرات سوء حرارتی می‌باشد. بیرون کشیده شدن الیاف در سوراخ‌کاری و نرم شدن ماتریس از عوامل انقباض سوراخ هستند [3].

جدایش لایه‌ای یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های خرابی در کامپوزیت‌ها می‌باشد که معمولاً در سوراخ‌کاری در هنگام ورود و خروج مته اتفاق می‌افتد. به جدایش لایه‌ای در هنگام ورود مته Peel up و به جدایش لایه‌ای در هنگام خروج مته Push up می‌گویند (شکل ۱).



شکل ۱ عیوب جدایش لایه‌ای در ورود و خروج مته [4]

جدایش لایه‌ای در هر دو مکانیزم رابطه‌ای مستقیم با نیروی محوری دارد. در هنگام ورود مته پس از آن‌که لبه‌ی برشی با لمینت تماس برقرار نمود، نیروی برشی اعمال‌شده در جهت محیطی یک نیرو در راستای محوری به‌سمت بالا ایجاد می‌کند که باعث جدایش لایه‌ای در صفحه بالایی لمینت می‌شود. زمانی که مته به انتهای قطعه می‌رسد ضخامت لایه‌ی بریده‌شده کم می‌شود. در چنین نقطه‌ای تنش ناشی از نیروی محوری از مقاومت بین لایه‌ای فراتر می‌رود و جدایش لایه‌ای رخ می‌دهد [4].

معیارهای مختلفی برای اندازه‌گیری جدایش لایه‌ای وجود دارد. به‌طور مرسوم فاکتور جدایش (F_d) لایه‌ای مطابق روابط زیر تعریف می‌شود:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad \text{یا} \quad F_{d'} = \frac{A_{max}}{A_0} \qquad (١)$$

که D_0 قطر نامی مته، A_0 مساحت نامی سوراخ مته، D_{max} حداکثر اندازه‌ی خرابی و A_{max} اندازه‌ی ناحیه با قطر D_{max} است.

دیویم و همکارانش [5] یک ضریب فاکتور جدایش لایه‌ای اصلاح‌شده را مطابق با رابطه‌ی زیر ارائه نمودند که بخش اول این رابطه اندازه‌ی ترک و بخش دوم اندازه‌ی خرابی را نشان می‌دهد:

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D_0} + \beta \frac{A_{max}}{A_0} \quad (۲)$$

با در نظر گرفتن تعاریف مناسب برای ضرایب α و β فاکتور جدایش لایه‌ای اصلاح‌شده برابر خواهد شد با:

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{max} - A_0)}\left(F_d^2 - F_d\right) \quad (۳)$$

که A_d مساحت ناحیه‌ی خرابی است.

بخش عمده‌ی تحقیقات در زمینه‌ی سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها درباره‌ی بهینه‌سازی و یافتن پارامترهای مناسب با استفاده از روش‌های مختلف می‌باشد. در فلزات مهم‌ترین پارامترهای بهینه‌سازی اغلب صافی سطح و کنترل سایش ابزار می‌باشد، در حالی که در کامپوزیت‌ها عدم عیوب و عدم کاهش مقاومت لمینت در ارجحیت قرار دارد. پارامترهای قابل کنترل در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها اغلب نرخ پیش‌روی، سرعت اسپیندل و پارامترهای هندسی مته می‌باشد. در مورد پارامترهای هندسی، پارامترهای جان مته و زاویه‌ی رأس تأثیر مهم‌تری بر نیروی محوری دارند.

پایش آنلاین فرآیند سوراخ‌کاری مزایای بسیاری از جمله کنترل فرآیند در حین آزمایش را داراست، با این وجود تعداد روش‌های پایش آنلاین بسیار محدود می‌باشد. مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش، استفاده از داده‌های نیروی محوری و گشتاور برشی برای توصیف فرآیند است. اما این داده‌ها کافی نیست، چون اطلاعاتی در مورد مکانیزم‌های شکست نمی‌دهد. هم‌چنین هزینه‌ی تجهیزات مربوط بالا می‌باشد.

در این مطالعه، برای ارزیابی فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها از روش آکوستیک امیشن (Acoustic Emission) استفاده گردید. روش آکوستیک امیشن (AE) یکی از روش‌های آنلاین است که اساس آن بر دریافت امواج الاستیک منتشرشده از منابع موضعی به‌واسطه‌ی آزاد شدن سریع انرژی می‌باشد [6]. امواج آکوستیکی که از نمونه منتشر می‌شوند خاصیت غیر پایداری (Non-stationary) و هم‌پوشانی گذرا (Overlapping transient) دارند. منابع ایجاد سیگنال در فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها به دو روش عمده طبقه‌بندی می‌شود: تغییر شکل به‌واسطه‌ی خرابی و فرآیند برش. به‌عنوان مثال ترک خوردن ماتریس متعلق به گروه اول و برش ماتریس متعلق به گروه دوم می‌باشد. برای شناسایی مکانیزم‌های مختلف شکست و برش در فرآیند سوراخ‌کاری استفاده از آنالیزهای مختلف سیگنال امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

هدف اصلی آنالیز سیگنال، استخراج اطلاعات از سیگنال‌هایی است که در ارتباط با پدیده‌های مختلف در فرآیندهای گوناگون می‌باشند. تحلیل و پردازش سیگنال‌ها، معمولاً در سه حوزه‌ی زمان، فرکانس و زمان- فرکانس قابل انجام است. در تحلیل‌های حوزه‌ی زمان، معمولاً ویژگی‌هایی از شکل موج (Waveform) استخراج می‌شود و با توجه به توزیع‌های آماری تفسیری بر روی سیگنال انجام می‌گیرد. در تبدیل فرکانسی مانند FFT بخش کوچکی از سیگنال در حوزه‌ی زمان که پنجره‌ی زمانی نامیده می‌شود، انتخاب می‌شود و طیف فرکانسی آن با استفاده از الگوریتم تبدیل به‌کار رفته در تحلیل محاسبه می‌گردد [7]. در تحلیل فرکانسی، هر مکانیزم خرابی به‌وسیله‌ی اختلاف در فرکانس ماکزیمم به‌دست آمده توسط آنالیز FFT به‌دست می‌آید. تحلیل در حوزه‌ی مشترک زمان و فرکانس موضوعی است که اولین بار گابور در سال ۱۹٤٦ با ارائه‌ی تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه سر فصل آن را گشود. برای تحلیل سیستم‌های یک‌نواخت که فرکانس‌های موجود در آن‌ها در زمان‌های مختلف ثابت باقی می‌ماند و همچنین سیگنال‌های ایستا از

روش‌های مبتنی بر تبدیل فوریه مانند PSD استفاده می‌شود. اما در پردازش سیگنال‌های غیریک‌نواخت که دارای فرکانس‌های متغیر با زمان و همچنین سیگنال-های غیرایستا که مشخصات آماری آن‌ها به زمان وابسته است، تبدیل فوریه کارآیی لازم را ندارد و قادر به آنالیز سیگنال‌هایی که شامل پدیده‌های گذرا، تغییرات ناگهانی و تحریک ضربه باشند، نخواهد بود. درحالی که این خصوصیات از مهم‌ترین ویژگی‌های یک سیگنال بوده و اغلب سیگنال‌های ارتعاشی دارای چنین خواصی هستند. برای رفع این مشکل از روش‌های تبدیل زمان–فرکانسی استفاده می‌شود که توانایی تحلیل سیگنال در هر دو حوزه‌ی زمان و فرکانس را دارند [8].

در این بخش به بررسی مطالعات انجام گرفته در زمینه‌ی سوراخ‌کاری کامپوزیت و مونیتورینگ آن می‌پردازیم. برخی از محققان به بررسی پارامترهای مؤثر بر سوراخ‌کاری و بهینه‌سازی آن پرداختند. خاشابا و همکارانش [9] اثرات متغیرهای برش (سرعت برشی و نرخ پیش‌روی) را بر نیروی محوری، گشتاور و جدایش لایه‌ای ورودی و خروجی در سوراخ‌کاری FRCM با درصدهای مختلف فایبر بررسی نمودند. آن‌ها از آنالیز رگرسیون خطی چند متغیره برای تحلیل داده‌های آزمایشگاهی استفاده نمودند. نتایج نشان داد افزایش نیروی محوری و گشتاور با افزایش درصد الیاف رابطه‌ی مستقیم دارد.

بحث دیگری که در فرآیند سوراخ‌کاری مطرح است، مونیتورینگ آن می‌باشد. راویشانکار و همکارانش [10] برای پایش سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها از روش آکوستیک امیشن استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد، افزایش نیروی محوری باعث افزایش تراز AE-RMS سیگنال می‌شود. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که ارزیابی خرابی ایجاد شده در سوراخ‌کاری به‌وسیله ویژگی‌های سیگنال آکوستیک امیشن امکان پذیر است. ارول و همکارانش [11] سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های پلیمری را توسط AE پایش نمودند. مطابق با طیف فرکانسی سیگنال‌های به‌دست آمده مشخص گردید، محدوده‌ی فرکانسی فرآیند بین ۳۰–۱۵۰ kHz می‌باشد.

گرچه هنوز از ابزار موجک در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها استفاده نشده است با این وجود برای تحلیل‌های سیگنال‌های آکوستیک امیشن در دیگر تست‌های مکانیکی از روش موجک استفاده گردیده است [12]. ولایدهام و همکارانش [13] از تبدیل موجک بسته‌ای (WPT) برای مونیتورینگ رفتار دینامیکی سوراخ‌کاری کامپوزیت‌هایی با درصد بالای الیاف استفاده نمودند. درصد بالای الیاف باعث سایش شدید ابزار می‌گردد. کینگ نی و همکارانش [14] ترتیب زمانی اتفاق افتادن هر مود و تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر را برای شکست الیاف و دیگر مکانیزم‌های شکست به روش آنالیز موجک شناسایی نمودند. آن‌ها نشان دادند که آنالیز موجک ابزار قدرتمندی برای شناسایی مودهای میکروخرابی و مکانیزم‌های میکروشکست مشخص در مواد کامپوزیتی می‌باشد.

در مقالات اشاره‌شده تلاشی برای یافتن ویژگی مشخصی به‌منظور تحلیل پدیده‌های اتفاق‌افتاده در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها نشده است. به‌عبارت دیگر تا به حال محدوده‌ی فرکانسی معینی برای مکانیزم‌های مختلف برش و شکست در حین فرآیند ارائه نگردیده است. در این مقاله ابتدا به‌کمک روش طراحی آزمایش عاملی کامل مؤثرترین پارامترها و حالت بهینه‌ی شرایط ماشین‌کاری تعیین گردید. هم‌چنین پس از معرفی آنالیز موجک، فعالیت‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. در بخش‌های بعدی نتایج در حوزه‌های زمان و زمان–فرکانس آنالیز گردیده و در نهایت نتیجه‌گیری جامعی ارائه شده است.

موجک

در تحلیل فوریه سیگنال به اجزای سازنده‌ی سینوسی خود شکسته می‌شود اما در تبدیل موجک، سیگنال

بـه‌صـورت تـوابعی از مقیـاس a (معـادل فرکـانس) و جابه‌جایی یا شیفت b (معـادل زمـان) از یـک موجـک شکسته می‌شود. تبدیل موجک در ابتدای دهـه‌ی ۱۹۸۰ توسط مورلت معرفی شد کـه بـرای ارزیـابی داده‌هـای زلزله به‌کـار رفـت. تبـدیل موجـک از مزایـای زیـادی نسبت به تبدیلات زمان- فرکانسی دیگر ماننـد تبـدیل فوریه زمان‌کوتاه و تبدیل ویگنر- ویل برخوردار اسـت که از آن جمله می‌توان به تفکیک‌پذیری آن اشاره نمود. در واقع در تبدیل موجک به‌جـای آن کـه سـیگنال بـه هارمونیک‌هـای خـود تجزیـه شـود، بـه توابـع اصـلی موضعی به نام موجک‌ها تجزیه می‌شـود. هـر موجـک دارای انرژی محدود می‌باشد که در موقعیـت متفـاوتی نسبت به موجک‌های دیگر بر روی محـور زمـان قـرار می‌گیرد و در فاصله‌ی کافی از موقعیت مرکـزی خـود، مقـدار آن بـه سـمت صـفر مـی‌گرایـد. موجـک‌هـا در مقیاس‌های بالا بسیار کوتاه اند و در مقیاس‌های پـایین، بازه‌ی زمانی نسبتاً طولانی‌تری را تحـت پوشـش قـرار می‌دهند. این ویژگی موجک‌ها، در آنالیز سـیگنال‌هـای ارتعاشـی دریافـت‌شـده از ماشـین‌هـا بسـیار مناسـب می‌باشد، چـرا کـه رفتـار موضـعی سـیگنال را آشـکار می‌سازد.

موجک گسسته. یک تابع پیوسـته‌ی زمـانی بـا مقـدار حقیقی یا مختلط $\psi(t)$ را در نظـر بگیریـد کـه دارای ویژگی‌های زیر باشد:

۱- انتگرال تـابع در بـازه‌ی $(-\infty,\infty)$ مسـاوی صـفر باشد.

$$\int_{-\infty}^{\infty}\psi(t).dt=0 \quad (٤)$$

۲- تابع متعلق به مجموعه‌ی توابع R^2 باشد یعنی:

$$\int_{-\infty}^{\infty}\left|\psi(t)\right|^2.dt<\infty \quad (٥)$$

اگر تابعی دو مشخصه‌ی فوق را داشته باشـد یـک موجک مادر نامیده می‌شود.

تابع ψ در هر دو حوزه‌ی زمان و فرکانس محدود می‌شود و قابلیت اعمال انتقال (Shifting) بـه میـزان b در حوزه‌ی زمان و مقیاس کردن (کشیدن و یـا فشـردن سیگنال) به میزان a در حوزه‌ی فرکانس را داراست. بـه این ترتیب $\psi_{a,b}(t)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\psi_{a,b}(t)=\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right),\quad a>b\in R \quad (٦)$$

رزولوشن زمانی و فرکانسـی تبـدیل موجـک، بـه مقدار مقیاس a بستگی دارد.

محاسبه‌ی مضارب موجک در تمـام مقیـاس‌هـا و جابه‌جایی‌های ممکن، حجم محاسبات زیـادی را نیـاز دارد. به همین علت می‌توان نشان داد کـه اگـر مقـادیر مقیـاس و جابـه‌جـایی بـه‌صـورت $a=2^j$ و $b=k2^j$ انتخاب شوند، عـلاوه بـر آن‌کـه تحلیـل بسـیار کـاراتر می‌شود، دقت نیز افزایش می‌یابـد. بـه چنـین تحلیلـی، تبدیل موجک گسسته (DWT) می‌گویند. یعنی در واقع مقادیر مقیاس و انتقال بایـد بـه‌صـورت اعـداد خـاص تعریف شوند. بنابراین تابع موجک در حالـت گسسـته به‌صورت زیر در می‌آید [15]:

$$\psi_{j,k}(n)=2^{-\frac{j}{2}}\,\psi(2^{-j}n-k)\ ,(j,k)\in Z^2 \quad (٧)$$

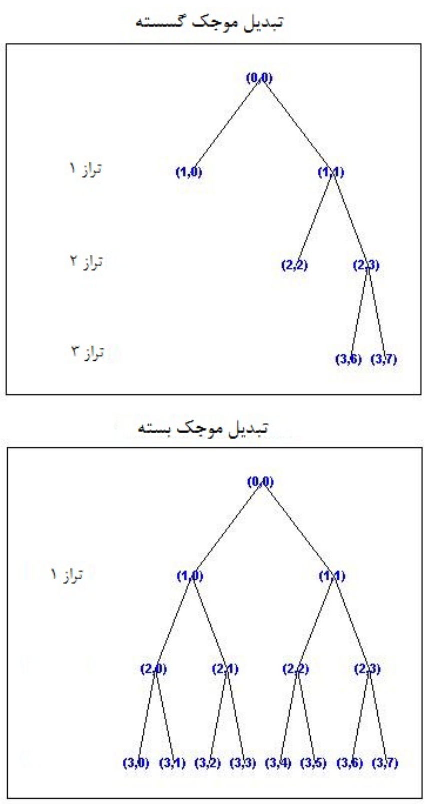
و ضرایب DWT سیگنال زمان گسسته x(n) بـا روابـط (۹ و ۸) نشان داده شده‌اند:

$$C(j,k)=\sum_{n\in N}x(n).\psi^{*}_{j,k}(n) \quad (٨)$$

$$D_j(n)=\sum_{k\in Z}C(j,k)\,\psi_{j,k}(n) \quad (٩)$$

در فرآیند جداسازی موجک گسسته، یک سـیگنال به دو بخش تقسیم می‌گردد: تقریب (Approximation)

و جزء (Detail). تقریب، بخش فرکانس پایین سیگنال می‌باشد و جزء، بخش فرکانس بالا می‌باشد. در مرحله‌ی بعد، تقریب به‌دست آمده خود به یک تقریب و جزء تجزیه می‌شود. این فرآیند ادامه خواهد یافت تا زمانی که به تراز مطلوب برسد. اطلاعات از دست رفته بین دو تقریب متوالی در جزء موجود می‌باشد. در موجک گسسته جزءهای متوالی دوباره آنالیز نمی‌شوند. در عوض در موجک بسته‌ای (Packet Wavelet)، جزء نیز به دو بخش تجزیه می‌شود. بدین سان موجک بسته‌ای آنالیز به‌تری را انجام می‌دهد. شکل (۲) درخت تبدیل موجک گسسته و بسته‌ای را نشان می‌دهد:



شکل ۲ درخت تبدیل موجک گسسته و بسته‌ای

فرآیند آزمایشگاهی

مواد. نمونه‌های استفاده‌شده در این تحقیق رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه است. خواص رزین اپوکسی و الیاف شیشه در جدول (۱) آورده شده است.

لمینت‌ها به‌وسیله‌ی لایه چینی دستی و با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر آماده شدند. ضخامت کامپوزیت ۵ میلی‌متر و ۱۳ لایه با درصد حجمی الیاف ٪۶۰ و نسبت پواسون ۰/۳ است.

جدول ۱ خواص مکانیکی رزین اپوکسی و الیاف شیشه به‌کار رفته

	*چگالی	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت نهایی کشش (MPa)
رزین اپوکسی	۱/۱۲	۲/۷	۸۰
الیاف شیشه بافته شده	۲۹۲	۷٤	۲۱۵۰

*برای پلیمر واحد چگالی g/cm^3 و برای الیاف شیشه چگالی سطح در نظر گرفته می‌شود یعنی g/cm^2

تجهیزات. آزمایش سوراخ‌کاری توسط ماشین فرز عمودی FP4M ساخته‌شده توسط شرکت تبریز انجام می‌گیرد. نیروی محوری در حین ماشین‌کاری توسط دینامومتر مدل B9255 متعلق به شرکت کیستلر (Kistler) اندازه‌گیری می‌شود. مته‌ی مارپیچ استاندارد HSS با قطر ۱۰ میلی‌متر و زاویه‌ی مارپیچ ۳۰ درجه برای آزمایش به‌کار گرفته شد. به‌منظور جلوگیری از تأثیر سایش بر آزمایش‌ها بعد از هر ٤ آزمایش ابزار تعویض شده و برای جلوگیری از واکنش‌های شیمیایی ناخواسته از مایع خنک‌کار استفاده نگردیده است. هر آزمایش دو بار تکرار شد. مجموعه آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است. دستگاه آکوستیک امیشن متعلق به کمپانی PAC به‌همراه یک سنسور پیزوالکتریک با فرکانس رزونانسی ۵۱۳/۲۸ کیلوهرتز و محدوده‌ی فرکانسی بهینه ۱۰۰–۷۵۰ کیلوهرتز به‌کار گرفته شد. سیگنال‌های AE توسط سیستم داده‌برداری PCI-2 جمع‌آوری و توسط نرم‌افزار AEWin به نمایش گذاشته می‌شود. سنسور بر روی نمونه، نزدیک سوراخ

(بـا فاصـله‌ی ۲۰ میلـی‌متـر)، بـا اسـتفاده از گیـریس سیلیکونی به‌عنوان کوپلنت آکوستیکی قـرار داده شـد. برای حذف نویز زمینه، حد آستانه ۳۵ دسـی‌بـل قـرار داده شد.



شکل ۳ مجموعه آزمایش سوراخ‌کاری.

طراحی آزمایش. آزمایش‌های سوراخ‌کـاری براسـاس طرح عـاملی کامـل (Full Factorial Design) طراحـی گردید. منظور از طرح عاملی کامـل ایـن اسـت کـه در اجرای کامل یا تکرار آزمایش، تمام ترکیب‌های حاصل از سـطوح عامـل‌هـای مـورد نظـر بررسـی شـود. در مطالعات صورت‌گرفته توسط نویسندگان [16] و سـایر محققـان [2, 4, 17] اثـر پارامترهـای ماشـین‌کـاری به‌وسیله‌ی طراحی آزمایش تاگوچی و آنالیز سیگنال بـه نویز بررسی گردیده است. با این وجـود تـلاش بسـیار کمی برای تعیین تقابـل اثـر پارامترهـا صـورت گرفتـه است. دلیل انتخاب طـرح عـاملی کامـل تعیـین اثـرات متقابـل پارامترهاسـت. افـزایش تعـداد تـرازهـا باعـث افـزایش چشـم گیـر آزمـایش‌هـا و در نتیجـه هزینـه می‌گـردد. بنـابراین، بـا توجـه بـه فعالیـت‌هـای قبلـی صورت‌گرفته تنها دو تراز انتخـاب گردیـد. طـرح‌هـای عاملی کامل مزایای زیادی در طراحی آزمـایش دارنـد. به‌عنوان مثال اگر اثر متقابل وجود داشته باشـد، آن‌گـاه اسـتفاده از طـرح عـاملی کامـل بـا هـدف اجتنـاب از نتیجه‌گیری‌های گمراه‌کننده ضروری بـه‌نظـر مـی‌رسـد. هم‌چنین طرح‌های عاملی کامـل امکـان بـرآورد اثـرات یک عامل را به‌ازای سطوح مختلـف عامـل‌هـای دیگـر فراهم می‌سازند و این باعث می‌شود تـا نتـایج حاصـل به‌ازای محـدوده‌ای از شـرایط آزمایشـی معتبـر باشـد. نرم‌افزار مینی‌تب (Minitab) که یکـی از نـرم‌افزارهـای مشـهور و قدرتمنـد در زمینـه‌ی تحلیـل‌هـای آمـاری می‌باشد، برای تهیه‌ی ماتریس طراحـی و آنـالیز داده‌هـا به‌کار گرفته شد. سه فـاکتور نـرخ پـیش‌روی، سـرعت برشی و زاویه‌ی رأس مته هر یـک در دو تـراز (طـرح کامل 2^3) به‌عنـوان پارامترهـای ورودی در نظـر گرفتـه شدند. نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای به‌عنوان مهـم‌تـرین پاسـخ‌هـای خروجـی در نظـر گرفتـه شـد. فاکتورهـای ورودی، ترازهـای مربـوط و پاسـخ‌هـای خروجی در جدول (۲) آورده شده است.

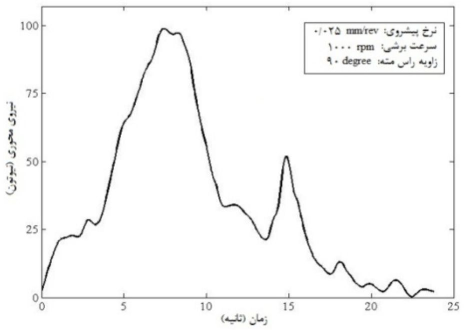
جدول ۲ فاکتورهای ورودی، ترازهای مربوط و پاسخ‌های خروجی آزمایش سوراخ‌کاری

ترازها	ورودی			پاسخ
	زاویه‌ی رأس مته (درجه)	سرعت برشی (دور بر دقیقه)	نرخ پیش‌روی (میلی‌متر بر دور)	نیروی محوری
۱-	۹۰	۳۱۵	۰/۰۲۵	فاکتور جدایش لایه‌ای
۱+	۱۳۰	۱۰۰۰	۰/۱	

نتایج آزمایشگاهی و بحث

تحلیل نیرویی فرآیند سوراخ‌کاری. معمولاً در سوراخ‌کاری مواد کامپوزیتی خرابی جدایش لایه‌ای شدیدتری در هنگام خروج مته رخ می‌دهد. محققان زیادی جدایش لایه‌ای را توسط روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی نموده‌اند و نشان دادند که این پدیده با نیروی محوری هنگام خروج مته متناسب است. بنابراین با افزایش نیروی محوری، جدایش لایه‌ای شدیدتری اتفاق می‌افتد. شکل (٤) تغییرات نیروی محوری را در آزمایش سوراخ‌کاری تحت شرایط، نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۹۰ درجه نشان می‌دهد. در شروع فرآیند، نیروی محوری به‌شدت افزایش می‌یابد. اولین افت در نمودار را می‌توان به مکانیزم جدایش لایه‌ای در ورودی (Peel up) نسبت داد. پس از درگیری لبه‌ی جان (Chisel edge) نیروی محوری با ورود لبه‌های اصلی برش افزایش پیدا می‌کند و سپس برای مدت نسبتاً کوتاهی حول مقدار ثابتی نوسان می‌کند تا زمانی که جدایش لایه‌ای اتفاق بیافتد. در این لحظه نیروی محوری پله‌ای کاهش می‌یابد و هر افت در نمودار را می‌توان به باز شدن یا رشد ترک نسبت داد.

جدول (۳) هشت آزمایش طرح عاملی کامل 2^3 را به‌همراه نتایج تجربی نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای نشان می‌دهد. همان‌گونه که در بخش آزمایش‌ها اشاره گردید هر تست دوبار تکرار شده و مقادیر میانگین آن ارائه گردید. ضمناً میزان انحراف از میانگین برای تمام آزمایش‌ها کم‌تر از ۵٪ بوده است. البته دو بار تکرار آزمایش‌ها دلیل بر تکرارپذیری نتایج نبوده و این موضوع نیاز به بررسی بیش‌تری دارد. برای محاسبه‌ی فاکتور جدایش لایه‌ای، نمونه‌ها پس از سوراخ‌کاری به‌کمک اسکنر دیجیتال با رزولوشن ۳۰۰۰dpi اسکن شدند. سپس مساحت ناحیه‌ی خرابی (A_d) و ماکزیمم قطر ناحیه‌ی خرابی (D_{max}) اندازه‌گیری گردید. نهایتاً با توجه به رابطه‌ی ۳ فاکتور جدایش اصلاح‌شده به‌دست آمد.



شکل ٤ تغییرات نیروی محوری در آزمایش سوراخ‌کاری

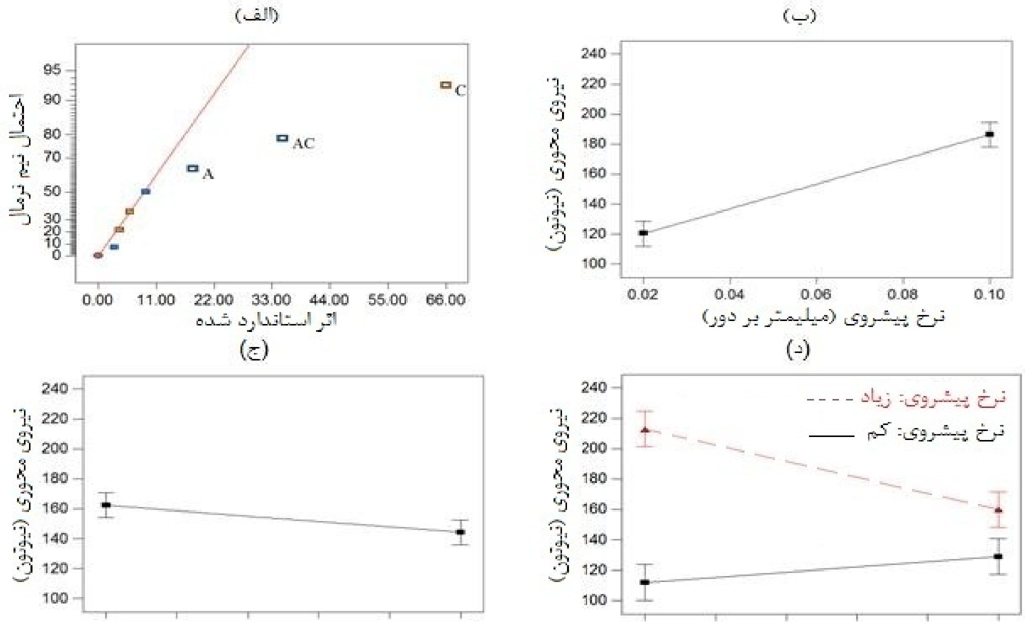
جدول ۳ نتایج تجربی نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای برای هشت آزمایش طرح عاملی کامل

شماره‌ی آزمایش	نرخ پیش‌روی (میلی‌متر بر دور)	سرعت برشی (دور بر دقیقه)	زاویه‌ی رأس مته (درجه)	نیروی محوری (نیوتن)	فاکتور جدایش لایه‌ای
۱	۹۰	۳۱۵	۰/۰۲۵	۱۰۱	۱/۰۸
۲	۱۳۰	۳۱۵	۰/۰۲۵	۱۳۱	۱/۱۵
۳	۹۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۵	۱۲۳	۱/۱۰
٤	۱۳۰	۱۰۰۰	۰/۰۲۵	۱۲۷	۱/۱۲
۵	۹۰	۳۱۵	۰/۱	۲۰۹	۱/۲۸
٦	۱۳۰	۳۱۵	۰/۱	۱٦۱	۱/۱۸
۷	۹۰	۱۰۰۰	۰/۱	۲۱۷	۱/۲۰
۸	۱۳۰	۱۰۰۰	۰/۱	۱۵۹	۱/۲۳

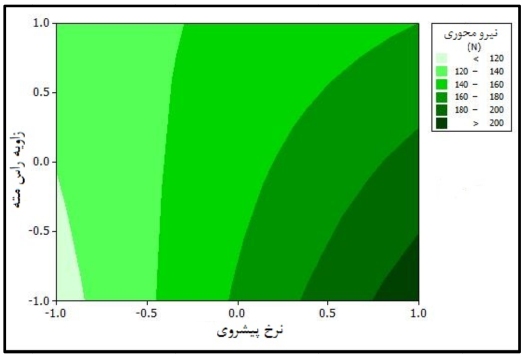
تحلیل نتایج نیروی محوری را با تهیه‌ی یک نمودار احتمال نیم‌نرمال (Half-normal probability plot) برای برآورد اثرات آغاز می‌کنیم. نمودار احتمال نیم‌نرمال ابزار گرافیکی است که از آن برای تعیین عوامل تأثیرگذار بر پاسخ در آنالیز طراحی عاملی کامل استفاده می‌شود. این نمودار میزان اثر عوامل آزمایش را به‌صورت استاندارد (مرتب‌شده به‌طور صعودی) در راستای محور افقی نشان می‌دهد. اثر استانداردشده برای یک عامل برابر با نسبت میانگین تمامی پاسخ‌ها به پاسخ بالاترین تراز یک فاکتور منهای نسبت میانگین تمامی پاسخ‌ها به پایین‌ترین تراز آن فاکتور است. در نمودار احتمال نیم‌نرمال اثرات، نقاطی که به‌دور از خط اصلی قرار می‌گیرند دارای اثرات مهم بر پاسخ می‌باشند. این اثرات هرچه مهم‌تر باشند دورتر از خط عبوری قرار می‌گیرند و به‌عبارت دیگر عوامل با تأثیر کم بر روی خط و یا نزدیک آن قرار می‌گیرند. در نمودار احتمال نیم‌نرمال تمامی اثرات مهم نمادگذاری می‌شوند و در سمت راست خط عبور داده‌شده قرار می‌گیرند. همان‌طور که از شکل (۵- الف) مشخص است، اثرات اصلی نرخ پیش‌روی (C) و زاویه‌ی رأس مته (A) و تقابل اثر آن‌ها معنادار هستند. اثرات اصلی نرخ پیش‌روی و زاویه‌ی رأس در نمودار (۵- ب و ج) رسم شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نرخ پیش‌روی دارای اثر مثبت و زاویه‌ی رأس دارای اثر منفی می‌باشد. اگر قرار باشد بر مبنای اثرات اصلی نتیجه‌گیری شود، آن‌گاه باید نرخ پیش‌روی را در سطح پایین و زاویه‌ی رأس را در سطح بالا به‌کار بریم تا نیروی محوری کمینه شود. با این وجود ضروری است که اثرات متقابل معنادار بررسی شوند. اثر متقابل نرخ پیش‌روی-زاویه‌ی رأس در شکل (۵- د) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، زاویه‌ی رأس به‌ازای سطوح زیاد و کم نرخ پیش‌روی به‌ترتیب تأثیر خیلی زیاد و کم را بر نیروی محوری نشان می‌دهد. هنگامی که نرخ پیش‌روی افزایش می‌یابد، سطح مقطع براده تغییر شکل‌نیافته (Undeformed chip) افزایش می‌یابد. این امر باعث افزایش نیروی محوری می‌شود. در نرخ پیش‌روی بالا با افزایش زاویه‌ی رأس، زاویه‌ی لبه‌ی برش (Cutting edge angle) افزایش می‌یابد که مطابق تحلیل نیرویی مکانیک برش مته باعث افزایش نیروی محوری می‌شود [18]. بنابراین به‌نظر می‌رسد به‌ترین شرایط برای کمینه کردن نیروی محوری به‌ازای سطوح کم نرخ پیش‌روی و زاویه‌ی رأس به‌دست می‌آید.

آنالیز پاسخ سطح (Response surface analysis) برای نمایش تأثیر هم‌زمان پارامترهای نرخ پیش‌روی و زاویه‌ی رأس مته بر نیروی محوری در شکل (٦) ارائه شده است. مطابق شکل درمی‌یابیم نیروی محوری در نرخ پیش‌روی بالا و زاویه‌ی رأس زیاد به‌صورت بحرانی است. بنابراین ایجاد جدایش لایه‌ای بالاتری انتظار می‌رود.

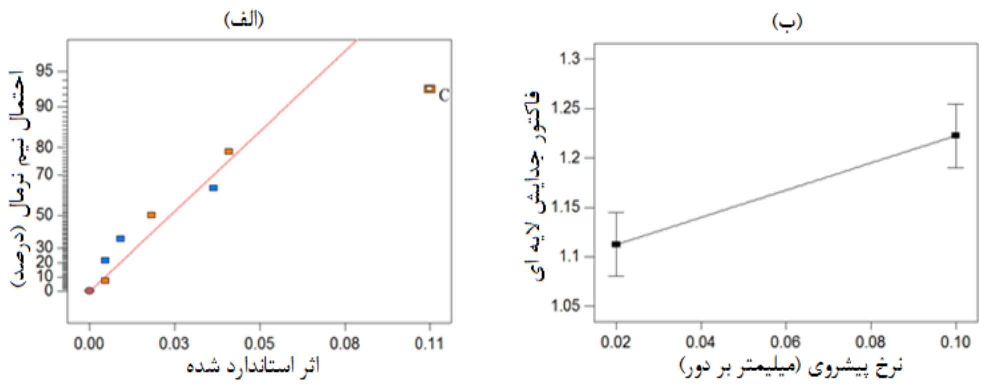
نمودار احتمال نیم‌نرمال برای برآورد اثرات پارامترهای مختلف بر فاکتور جدایش لایه‌ای در شکل (۷- الف) رسم شده است. با توجه به نمودار تنها اثر معنادار نرخ پیش‌روی (C) است. اثر این عامل در نمودار (۷- ب) رسم شده است که حاکی از اثر مثبت نرخ پیش‌روی است. این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با افزایش نرخ پیش‌روی رفتار سوراخ‌کاری به ضربه نزدیک‌تر می‌گردد و طی آن فرصت لازم برای برش کامپوزیت از دست می‌رود و مته به‌جای برش ماده با پانچ نمودن لایه‌ها به داخل ماده نفوذ می‌کند. نیروی متمرکز فشاری ایجادشده باعث خمش لایه‌های باقی‌مانده و متعاقباً رشد بیش‌تر ترک‌های بین لایه‌ای می‌شود. بنابراین به‌نظر می‌رسد به‌ترین شرایط برای کمینه کردن فاکتور جدایش لایه‌ای به‌ازای سطح کم نرخ پیش‌روی به‌دست می‌آید. این نکته را باید اشاره کرد که به‌واسطه‌ی تعداد سطوح انتخاب‌شده و میزان تکرارپذیری، نتایج به‌دست‌آمده فقط در محدوده‌ی بررسی شده مقادیر متغیرها معتبرمی‌باشد.



شکل ۵ الف) نمودار احتمال نیم‌نرمال برای برآورد اثرات بر نیروی محوری، ب) اثر اصلی نرخ پیش‌روی، ج) اثر اصلی زاویه‌ی رأس، د) اثر متقابل نرخ پیش‌روی-زاویه‌ی رأس



شکل ٦ آنالیز پاسخ سطحی پارامترهای مؤثر بر نیروی محوری

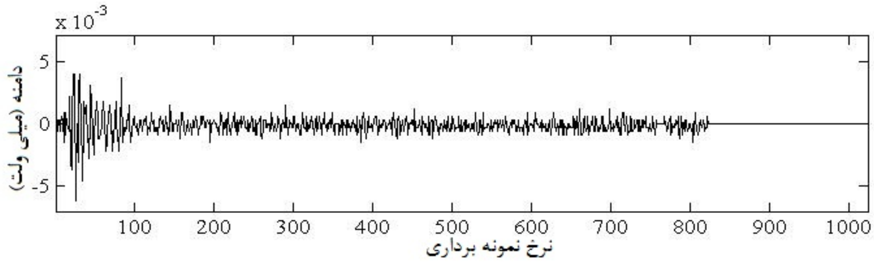


شکل ۷ الف) نمودار احتمال نیم‌نرمال برای برآورد اثرات بر فاکتور جدایش لایه‌ای، ب) اثر اصلی نرخ پیش‌روی

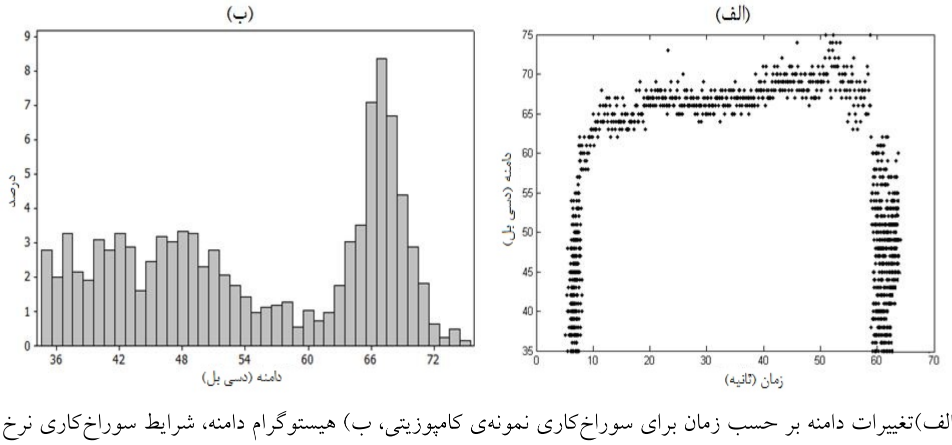
تحلیل سیگنال‌های آکوستیکی فرآیند سوراخ‌کاری

تحلیل حوزه‌ی زمان. آنالیز سیگنال‌های آکوستیک امیشن دریافت‌شده در حین فرآیند سوراخ‌کاری نیازمند استفاده از روش‌هایی علاوه بر حوزه‌ی زمان می‌باشد. با این وجود، آنالیز پارامتریک AE (حوزه‌ی زمان) هنوز به‌طور گسترده کاربرد دارد. یک سیگنال نوعی در حین فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت الیاف شیشه‌ی رزین اپوکسی در شکل (۸) نشان داده شده است. از این سیگنال‌ها اطلاعات ارزشمندی به‌دست می‌آید که به‌طور خلاصه در زیر ارائه شده است.

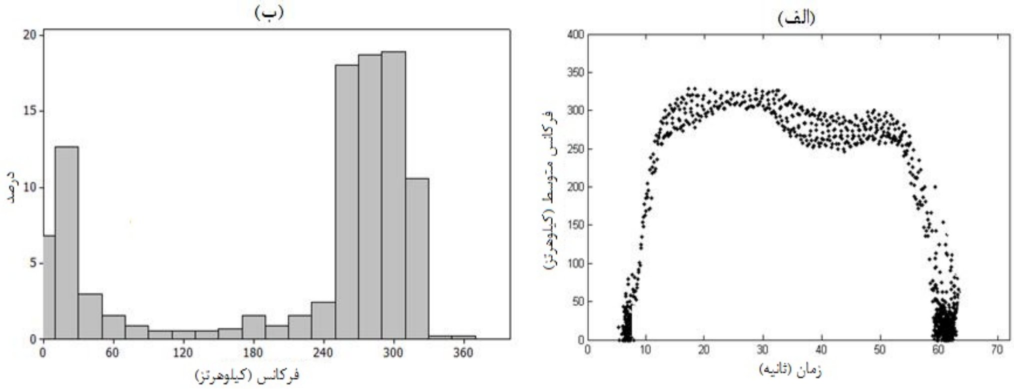
شکل (۹- الف) تغییرات دامنه بر حسب زمان را برای سوراخ‌کاری نمونه‌ی کامپوزیتی تحت شرایط نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۳۱۵ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۱۳۰ درجه نشان می‌دهد. با شروع فرآیند دامنه به‌شدت شروع به افزایش می‌یابد و پس از چند ثانیه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این رشد ناگهانی عمدتاً به‌واسطه‌ی نفوذ جان مته (Chisel edge) می‌باشد. سپس دامنه برای مدتی طولانی حول مقدار ثابتی نوسان می‌کند که در این زمان فرآیند سوراخ‌کاری در حال انجام می‌باشد و حجم زیادی از ماده برداشته می‌شود. شکل (۸- ب) هیستوگرام دامنه را برای آزمایش اشاره‌شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سیگنال‌های AE دریافت‌شده برای این آزمایش دارای دو محدوده‌ی دامنه‌ی غالب می‌باشند. محدوده‌ی غالب اول بین ۶۰–۷۰ دسی‌بل می‌باشد که مربوط به سیگنال‌های فرآیند سوراخ‌کاری است و محدوده غالب دوم ۳۵–۶۰ دسی‌بل است که مربوط به سیگنال‌های دریافت شده هنگام خروج و ورود مته می‌باشد. این نکته باید اشاره گردد که محدوده‌ی دامنه‌ی غالب برای همه‌ی آزمایش‌های سوراخ‌کاری بین ۵۵–۸۰ دسی‌بل است.



شکل ۸ سیگنال نوعی در حین فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت الیاف شیشه رزین اپوکسی



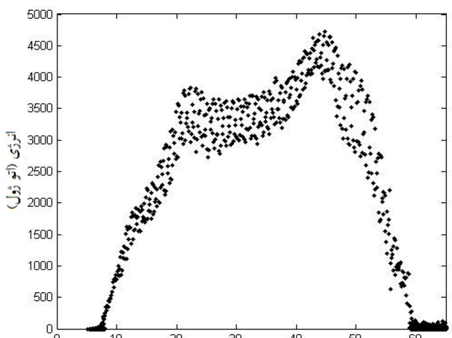
شکل ۹ الف)تغییرات دامنه بر حسب زمان برای سوراخ‌کاری نمونه‌ی کامپوزیتی، ب) هیستوگرام دامنه، شرایط سوراخ‌کاری نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۳۱۵ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۱۳۰ درجه



شکل ۱۰ الف)تغییرات فرکانس میانگین بر حسب زمان برای سوراخ‌کاری نمونه‌ی کامپوزیتی، ب) هیستوگرام فرکانس میانگین، شرایط سوراخ‌کاری نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۳۱۵ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۱۳۰ درجه

تغییرات میانگین فرکانس سیگنال‌های AE و هیستوگرام آن به‌ترتیب در شکل (۱۰- الف و ب) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، محدوده‌ی میانگین فرکانسی غالب در حین فرآیند سوراخ‌کاری بین ۲٤۰-۳۳۰ کیلوهرتز می‌باشد. در واقع دو محدوده‌ی میانگین غالب برای سیگنال‌های دریافت‌شده وجود دارد. اولین محدوده‌ی غالب با فرکانس میانگین کم‌تر از ۲۰۰ کیلوهرتز را می‌توان به پدیده‌ی تماس جان مته و نفوذ آن در هنگام وارد شدن و نیز سایش ابزار با دیواره در هنگام خارج شدن نسبت داد. دومین محدوده‌ی فرکانسی غالب را نیز می‌توان به پدیده‌های برش کامپوزیت توسط لبه‌ی برنده‌ی اصلی و فرعی و خرابی‌های ایجادشده به‌واسطه‌ی سوراخ‌کاری نسبت داد. هم‌چنین با مشاهده‌ی نتایج همه‌ی آزمایش‌ها، محدوده‌ی فرکانسی غالب برای سوراخ‌کاری در شرایط مختلف ماشین‌کاری بین ۲۰۰-۳۵۰ کیلوهرتز به‌دست آمد. می‌توان نتیجه‌گیری نمود که سیگنال‌های تولیدشده در فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها محدوده میانگین فرکانسی نسبتاً باریکی دارند که به نوعی می‌تواند جزء خصوصیات فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها باشد.

شکل (۱۱) تغییرات انرژی بر حسب زمان را نشان می‌دهد. سطح زیر نمودار سیگنال یک‌سوشده (Rectified) را انرژی گویند. انرژی به دامنه و زمان تداوم (Duration) هر سیگنال وابسته است و حساسیت کم‌تری به حد آستانه و فرکانس کاری دارد. با محاسبه انرژی به‌نوعی می‌توان بزرگی اتفاقی را که در یک سازه رخ می‌دهد را مانیتور نمود. در شروع فرآیند سوراخ‌کاری، انرژی سیگنال‌های AE افزایش و سپس اندکی کاهش می‌یابند. در مرحله‌ی بعدی انرژی آکوستیکی برای چندین ثانیه تقریباً تغییر چندانی ندارد و سپس با شیب کم‌تری نسبت به شیب اولیه شروع به افزایش می‌کند. این رشد ثانویه را می‌توان به جوانه‌زنی و رشد ترک جدایش لایه‌ای بین لایه‌ها در هنگام خروج مته نسبت داد.



شکل ۱۱ تغییرات انرژی بر حسب زمان تحت شرایط سوراخ‌کاری نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۳۱۵ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۱۳۰ درجه

تحلیل حوزه‌ی زمان – فرکانس. تئوری موجک بسته‌ای در بخش قبلی مقاله توضیح داده شد. اشاره گردید که سیگنال به مجموعه‌ای از المان‌ها (Componenets) تجزیه می‌شود و هر المان محدوده‌ی فرکانس معینی دارد. در حین فرآیند سوراخ‌کاری نمونه‌ی کامپوزیتی GFRP، تعداد زیادی سیگنال AE دریافت گردید. به‌عنوان مثال ۹۷۰ سیگنال در حین سوراخ‌کاری نمونه با شرایط ماشین‌کاری نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۳۱۵ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۱۳۰ درجه، ثبت گردید. برای آنالیز سیگنال‌ها، از نرم‌افزار متلب (MATLAB) جهت تحلیل موجک سیگنال‌ها استفاده گردید. مزیت نرم‌افزار متلب نسبت به دیگر نرم‌افزارهای تحلیل موجک، وجود جعبه ابزار (Toolbox) موجک با قابلیت‌های متنوع و هم‌چنین قابلیت برنامه‌نویسی و تهیه‌ی کد مطابق با نیاز می‌باشد.

همه‌ی سیگنال‌های دریافت‌شده، در محیط کاری (Workspace) نرم‌افزار متلب وارد شدند. سپس تبدیل موجک بسته‌ای برای هر سیگنال استفاده گردید. سیگنال AE اولیه بعد از اعمال تبدیل موجک بسته‌ای به ترازها و المان‌های مختلف تجزیه می‌شود. هر المان محدوده‌ی فرکانس معینی دارد و مجموع همه‌ی المان‌ها دریک تراز معین سیگنال اولیه را می‌سازند. در تحلیل موجک دو پارامتر بسیار مهم وجود دارد که باید توسط کاربر تعریف شوند: ۱- تعداد ترازها و ۲- نوع موجک مادر.

در مطالعه‌ی اخیر، تعداد ترازها بر اساس معیاری ریاضی به‌نام انتروپی (Entropy)، سه تراز انتخاب گردید. برای انتخاب موجک مادر، که به‌ترین تطابق را با ویژگی های سیگنال AE داشته باشد، از میان موجک‌های مادر استاندارد به‌صورت چشمی، بازرسی انجام گردید. پس از مشاهده‌ی چشمی دریافتیم که موجک مادر db 20 (یکی از اعضای خانواده موجک دبیچز (Daubechies)) به خصوصیات سیگنال‌های AE دریافت‌شده شبیه‌تر می‌باشد.

برای آنالیز سیگنال‌های AE معیار انرژی به‌کار گرفته شد، زیرا توزیع مختلف انرژی در هر المان را می‌توان به مکانیزم برش یا خرابی خاصی در حین فرآیند سوراخ‌کاری نسبت داد. میزان انرژی هر المان بعد از تجزیه‌ی همه‌ی سیگنال‌های AE مطابق رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شود.

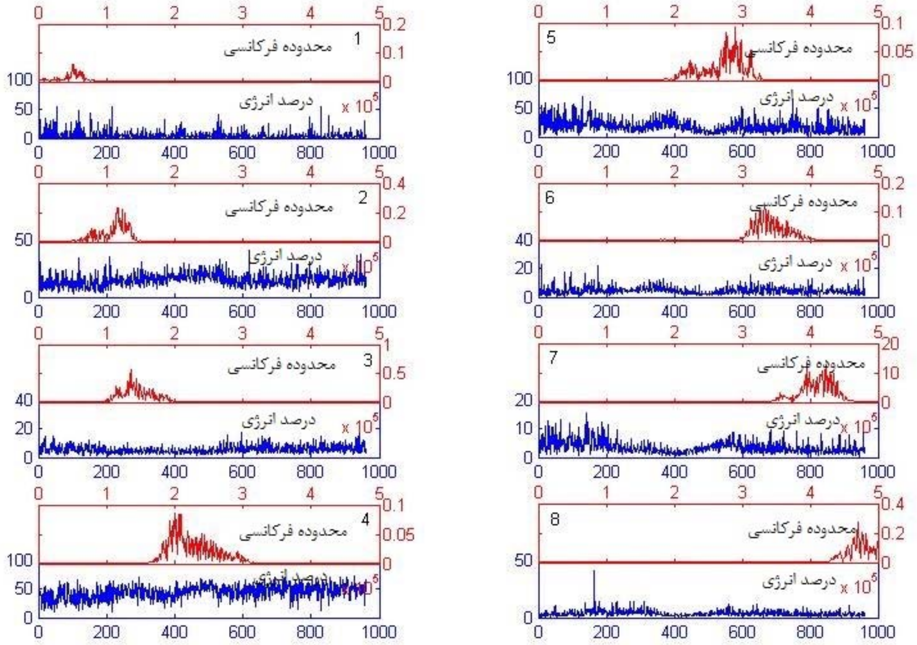
$$EC_i(t) = \sum_{\tau=t_0}^{t} \left(f_i(\tau)\right)^2 \qquad (۱۰)$$

که $EC_i(t)$ (Energy of Component) نشان دهنده‌ی انرژی المان i در تراز معین می‌باشد. کل انرژی یک تراز برابر با مجموع انرژی همه‌ی المان‌های آن تراز می‌باشد. در این مقاله، نسبت انرژی در المان‌های مختلف به انرژی کل، برای یافتن درصد انرژی هر المان یا $EPC_i(t)$ (Energy Percentage of Component) به‌کار گرفته شد.

$$EPC_i(t) = \frac{EC_i(t)}{EC_{Total}(t)} \qquad i = 1...2^j \qquad (۱۱)$$

که j تراز تجزیه (j=۳) و i تعداد المان‌ها می‌باشد (i=۲۳). در بخش پایینی شکل (۱۲)، تجزیه‌ی موجک بسته‌ای سه‌ترازه و درصد انرژی المان از سیگنال‌های AE دریافت‌شده از سوراخ‌کاری کامپوزیت تحت شرایط نرخ پیش‌روی ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دور، سرعت برشی ۳۱۵ دور بر دقیقه و زاویه‌ی رأس ۱۳۰ درجه نشان داده شده است.

هر المان در تراز سوم نمایانگر محدوده‌ی فرکانسی معینی می‌باشد که این محدوده از هر تراز به تراز دیگر افزایش می‌یابد. روش FFT برای به‌دست آوردن محتوای فرکانسی سیگنال‌های تجزیه‌شده به‌کار گرفته شد. محتوای فرکانسی هر المان از سیگنال‌های تجزیه‌شده در شکل (۱۲) بخش بالایی دیاگرام نشان داده شده است.



شکل ۱۲ درصد انرژی و محدوده فرکانسی هشت المان مختلف

جدول ٤ محدوده‌ی فرکانسی و درصد انرژی هشت المان از تراز سوم تحلیل موجک

	المان ۱	المان ۲	المان ۳	المان ٤	المان ٥	المان ٦	المان ۷	المان ۸
محدوده‌ی فرکانسی (kHz)	۰–٦۲/٥	٦۲/٥–۱۲٥	۱۲٥–۱۸۷/٥	۱۸۷/٥–۲٥۰	۲٥۰–۳۱۲/٥	۳۱۲/٥–۳۷٥	۳۷٥–٤۳۷/٥	٤۳۷/٥–٥۰۰
درصد انرژی	٤/۳	۱۳/٤	۷/۲	۲۳/۹	۳۲	۸/۱	٥/۲	٥/۹

نمودار مشخص می‌کند که محدوده‌ی فرکانسی المان‌های تجزیه‌شده، از یک المان به المان دیگر افزایش می‌یابد. محدوده‌ی فرکانسی و درصد انرژی برای هشت المان از تراز سوم در جدول (٤) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین درصد انرژی در سه تراز المان ۲ (EPC2)، المان٤ (EPC4) و المان ٥ (EPC5) قرار دارد. این سه المان حدود ۷۰٪ کل انرژی سیگنال را دارا هستند. به‌علاوه آن‌ها محدوده‌ی فرکانسی مختلفی دارند بنابراین می‌توانند به مکانیزم‌های مختلف شکست و خرابی در حین فرآیند سوراخ‌کاری نسبت داده شوند.

مهم‌ترین منابع ایجاد سیگنال آکوستیک امیشن در فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها عبارتند از: برش ماتریس، برش الیاف، جدایش لایه‌ای، بیرون‌کشیدگی الیاف و اصطکاک. مارس و همکارانش [13] با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال‌های AE را در حین تست کشش کلاس‌بندی نمودند. آن‌ها نشان دادند که ترک خوردن ماتریس به‌عنوان اولین مکانیزم خرابی مشاهده‌شده در حین تست کشش، سیگنال‌هایی با محدوده‌ی فرکانسی پایین (۵۰–۱۵۰ کیلوهرتز) ایجاد می‌کند. اگرچه در فرآیند سوراخ‌کاری، ترکیبی از مکانیزم خرابی و عمل برش به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهد، پیش‌بینی می‌شود که سیگنال‌های منتشرشده از برش و ترک خوردن ماتریس در فرآیند سوراخ‌کاری،

محدوده‌ی فرکانسی نسبتاً مشابهی با تست کشش دارد. ازاین‌رو، المان۲ (EPC2) با محدوده‌ی ۶۲/۵–۱۲۵ کیلوهرتز می‌تواند به ترک خوردن ماتریس نسبت داده شود.

المان ۵ (EPC5) با محدوده‌ی ۲۵۰–۳۱۲/۵ کیلوهرتز و میانگین درصد انرژی ۳۲٪ غالب‌ترین محدوده‌ی فرکانسی می‌باشد. در نتیجه، این المان از نظر انرژی می‌تواند به برش الیاف نسبت داده شود. برش الیاف توسط مته به‌واسطه‌ی سختی الیاف نیازمند انرژی بالای ورودی می‌باشد. هم‌چنین برش الیاف انرژی بالایی در نمونه آزاد می‌شود که توسط سنسور AE دریافت می‌گردد. دیگر المان غالب موجک (EPC4) را نمی‌توان به مکانیزم‌های دیگری نسبت داد چون شاهدی برای ارتباط یک مکانیزم خرابی یا برش به این محدوده‌ی فرکانسی وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر پارامترهای نرخ پیش‌روی، سرعت برشی و زاویه‌ی رأس مته بر نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای با استفاده از روش طراحی آزمایش عاملی کامل بررسی شد. هم‌چنین روش آکوستیک امیشن به‌همراه روش تحلیل سیگنال موجک برای پایش فرآیند سوراخ‌کاری و تفکیک حوزه‌ی فرکانسی مکانیزم‌های مختلف برش به‌کار گرفته شد. این نکته باید اشاره گردد که به‌واسطه‌ی تعداد سطوح انتخاب‌شده و میزان تکرارپذیری، نتایج به دست آمده فقط درمحدوده‌ی بررسی‌شده‌ی مقادیر متغیرها معتبر می‌باشد.

نتایج به‌طور خلاصه در زیر ارائه می‌شود:

– رفتار سوراخ‌کاری کامپوزیت از زمان ورود تا خروج توسط دیاگرام نیروی محوری تحلیل گردید. نمودار احتمال نیم‌نرمال برای برآورد اثرات پارامترهای مختلف بر نیروی محوری به‌کار گرفته شد. بر مبنای اثرات اصلی، نرخ پیش‌روی دارای اثر مثبت و زاویه‌ی رأس دارای اثر منفی می‌باشد.

– آنالیز پاسخ سطح برای نمایش تأثیر هم‌زمان پارامترهای نرخ پیش‌روی و زاویه‌ی رأس مته بر نیروی محوری به‌کار گرفته شد. با توجه به نتایج، نیروی محوری در نرخ پیش‌روی بالا و زاویه‌ی رأس زیاد به‌صورت بحرانی بود. در نتیجه ایجاد جدایش لایه‌ای بالاتری انتظار می‌رود.

– نمودار احتمال نرمال برای برآورد اثرات پارامترهای مختلف بر فاکتور جدایش لایه‌ای استفاده گردید. مطابق نتایج تنها اثر معنادار، نرخ پیش‌روی است.

– از پارامترهای حوزه‌ی زمان دامنه، فرکانس میانگین و انرژی برای تفسیر سیگنال‌های آکوستیک امیشن فرآیند سوراخ‌کاری استفاده گردید. مطابق نتایج، محدوده‌ی دامنه و فرکانس میانگین غالب به‌ترتیب برای همه‌ی آزمایش‌ها بین ۵۵–۸۰ دسی‌بل و ۲۰۰–۳۵۰ کیلوهرتز است.

–مطابق تحلیل‌های انجام‌گرفته در حوزه‌ی موجک، المان۲ (EPC2) با محدوده‌ی ۶۲/۵–۱۲۵ کیلوهرتز به ترک خوردن ماتریس و المان ۵ (EPC5) با محدوده‌ی ۲۵۰–۳۱۲/۵ کیلوهرتز و میانگین درصد انرژی ۳۲٪ به برش الیاف نسبت داده شد.

مراجع

1. Singh, I., Bhatnagar, N. and Viswanath, P.,"Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastic : Experimental and finite element study", *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 546-553, (2008).
2. Tsao, C.C. and Hocheng, H.,"Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44 pp.

1085–1090, (2004).

3. Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F. and Surcin, L., "Drilling of composite structures", *Composite Structure*, Vol. 52, pp. 511-516, (2002).
4. Davim, J. P. and P. Reis, "Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments", *Composite Structures*, Vol. 59, pp. 481–487, (2003).
5. Davim, J. P., Rubio J. C. and Abrao A. M.,"A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 1939–1945, (2007)
6. Miller, R.K. and Mcintire, P., "*Handbook of Nondestructive testing*", 2nd Edition Vol. 5, Acoustic Emission, American Society for Nondestructive Testing, (1987).
7. Jemielniak, K.,"Some aspect of acoustic emission signal processing", *Journal of Material Processing Technology*, Vol .109, pp. 242-247, (2001).
8. Weeks, M., "*Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets*", Infinity Science Press, (2006).
9. Khashaba, U.A., Seif, M.A. and Elhamid, M.A., "Drilling analysis of chopped composites", *Composites :Part A*, Vol. 38, pp. 61–70, (2007).
10. Ravishankar, S.R.and Murthy, C.R.L., "Application of acoustic emission in drilling of composite laminates", *NDT&E International*, Vol. 33, pp. 429–435, (2000).
11. Arul, S., Vijayaraghavan, L. and Malhotra, S.K., "Online monitoring of acoustic emission for quality control in drilling of polymeric composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, pp. 184–190, (2007).
12. Marec, A., Thomas, J. H. and El Guerjouma, R. "Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, pp. 1441-1464, (2008).
13. Velayudham, A., Krishnamurthy, R. and Soundarapandian, T., "Acoustic emission based drill condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 412, pp. 141–145, (2005).
14. Ni Q. Q. and Iwamoto M.,"Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites", *Engineering Fracture Mechanic*, Vol. 69, pp. 717-728, (2002).
15. D. Lee Fugal, "*Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing*", Space& Signals Technical Publishing, (2009).
16. Karimi, N.Z., Heidary, H., Ahmadi, M., "Residual tensile strength monitoring of drilled composite materials by acoustic emission". *Material and Design*, Vol. 40, pp. 229–236, (2012).
17. Kilickap, E, "Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method drilling of GFRP composite*." Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 6116-6122, (2010).
18. Strenkowski, J.S., Hsieh, C.C., Shih, A.J.,"An analytical finite element technique for predicting thrust forceand torque in drilling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 1413–1421, (2004).